УДК 629.7.054.847

# МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.С. Дмитриев, Т.Г. Костюченко, В.А. Скрипняк*

Томский политехнический университет
*Томский государственный университет
E-mail: dtps@lcg.tpu.ru

*Приводятся результаты механического анализа конструкции исполнительного органа системы ориентации космического аппарата. Экспериментальная проверка результатов расчета показала хорошую степень достоверности моделей, имитирующих работу прибора.*

Исполнительные органы (ИО) на базе силовых гироскопов или управляемых по скорости двигателей-маховиков применяются для управления ориентацией длительно существующих маневренных космических аппаратов (КА), для которых кинетический момент измеряется в диапазоне от 1 до 50 Нмс [1].

По мере развития космической техники постоянно растут требования к системам ориентации, и, соответственно, к исполнительным органам, совершенствуются технологии их проектирования и расчета. Поэтому одним из основных требований при разработке исполнительных органов систем ориентации (СО) космических аппаратов является проведение механического анализа конструкции [2, 3].

Механический анализ – это прочностной анализ конструкции методом конечных элементов, наиболее распространенным и эффективным на сегодняшний день методом прочностного расчета.

Работа предусматривала создание математической конечно-элементной модели и проведение механического анализа конструкции исполнительного органа, состоящего из блока механики (БМ) и блока автоматики (БА). Было предусмотрено проведение механического анализа как отдельно для БМ и БА, так и для всего прибора в сборе.

Механический анализ включает в себя [4, 5]:

- создание математической конечно-элементной модели конструкции прибора (трехмерная геометрическая модель, конечно-элементная модель, модель механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции);
- непосредственно проведение механического анализа, который включает в себя определение собственных часто и форм колебаний, расчет критических случаев нагружения, анализ механического поведения элементов конструкции.

*Первым этапом* работы было создание трехмерной геометрической модели конструкции БМ и БА. Это осуществлялось с использованием программных продуктов T-Flex CAD 3D и ANSYS. Необходимо отметить сложность геометрических форм БМ и БА, особенно БМ, имеющих множество мелких деталей, фасок, выемок и тому подобных «мелочей». Поэтому построение 3D-моделей оказалось непростой и трудоемкой процедурой.

На *втором этапе* при создании конечно-элементной модели конструкция представляется в виде совокупности конечных элементов. Математические задачи о деформации тела под воздействием механических нагрузок, синусоидальных нагрузок, об определении частот собственных колебаний и т.п. решаются на основе дискретного представления тела с помощью конечных элементов. Получаемые численные решения зависят от того, насколько адекватно выполнено представление тела конечными элементами.

При создании конечно-элементных моделей конструктивных элементов БМ и БА использовались тетрагональные 10-узловые конечные элементы типа Solid-187.

При выполнении механического анализа проводился анализ сходимости численных результатов при различных способах представления элементов конструкций в виде конечных элементов. «Истинным» считался результат, соответствующий конечно-элементной модели с максимальным числом конечных элементов, уменьшение которого приводит к изменению основных значений расчетных параметров не более чем на 1...2 %.

На рис. 1 приведены конечно-элементные модели основных элементов конструкций БМ и БА.

*Третьим этапом* было создание модели механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции.

В табл. 1 приведены принятые значения основных параметров, характеризующие свойства этих материалов.

Первой и основной процедурой механического анализа, без которой невозможно проведение других видов анализа, является модальный анализ, который предназначен для определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкций. Знание собственных частот необходимо при конструировании деталей и узлов, чтобы избежать их возбуждения на одной из собственных частот в процессе эксплуатации.

Модальный анализ проводился как для отдельных конструктивных элементов БМ и БА, так и для блоков в сборе.

В табл. 2 и 3 приведены расчетные собственные частоты колебаний для элементов конструкции БМ и БА и блоков в сборе.

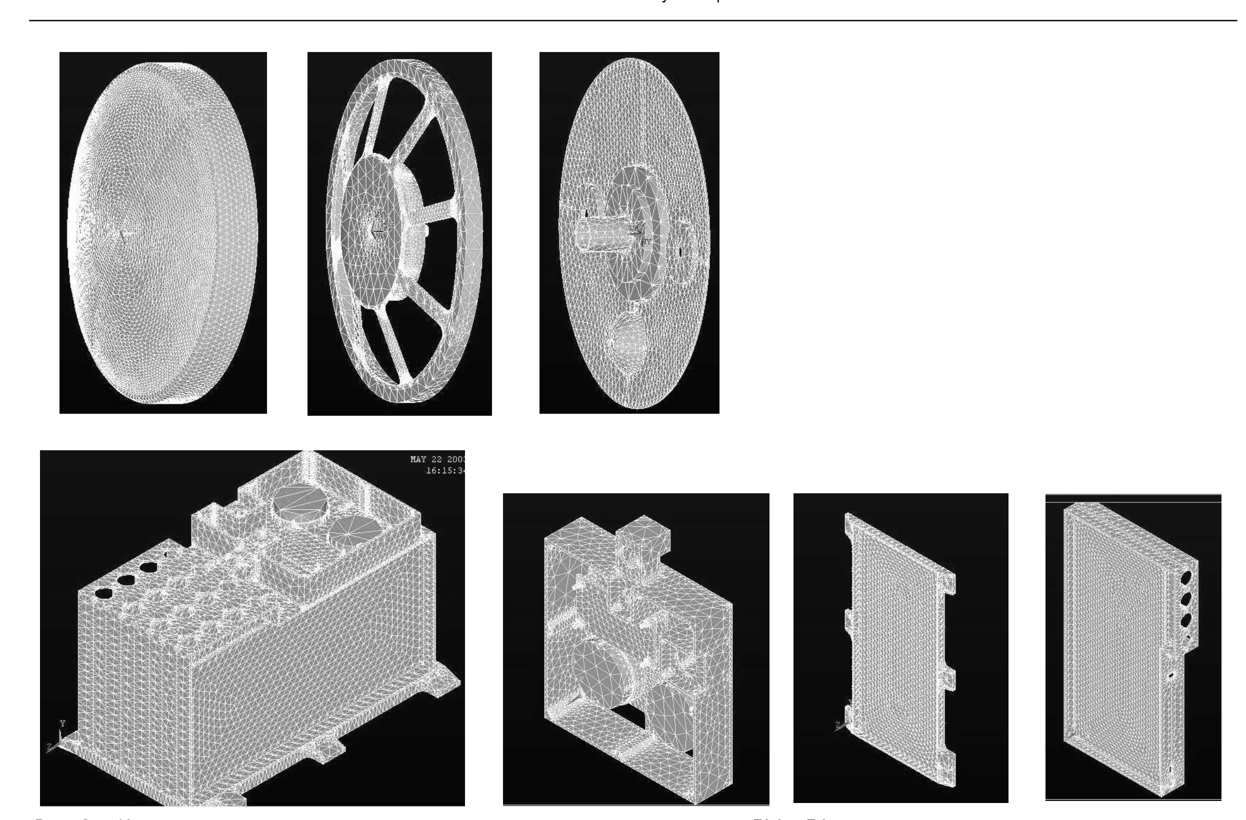


*Рис. 1.* Конечно-элементные модели основных конструктивных элементов БМ и БА

***Таблица 1.*** *Принятые значения параметров материалов*

| Материал | Сталь 20Х13 ГОСТ 5949-75 | Магний МА2-1 ГОСТ 21990-76 | Алюминиевый сплав АмцМ-1 ГОСТ 21631-76 | Алюминиевый сплав АМг2 ГОСТ 21631-76 |
|---|---|---|---|---|
| Массовая плотность, кг/м³ | 7850 | 1790 | 2700 | 2700 |
| Модуль Юнга, ГПа | 20,7 | 41,0 | 73,0 | 73,0 |
| Коэффициент Пуассона | 0,29 | – | 0,33 | 0,33 |
| Коэффициент линейного расширения, $K^{-1}$ | $1,51{\cdot}10^{-5}$ | $2,60{\cdot}10^{-5}$ | $2,43{\cdot}10^{-5}$ | $2,43{\cdot}10^{-5}$ |
| Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) | 419 | 1100 | 963 | 963 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 46,7 | 69,1 | 156,0 | 156,0 |

***Таблица 2.*** *Расчетные собственные частоты колебаний для БМ, Гц*

| Номер моды | БМ | Маховик | Корпус основания | Кожух |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 156,11 | 138,17 | 709,83 | 1403,3 |
| 2 | 164,43 | 138,69 | 720,14 | 1702,3 |
| 3 | 218,72 | 289,41 | 734,58 | 1702,8 |
| 4 | 389,85 | 424,07 | – | 1763,5 |
| 5 | 390,85 | 425,84 | – | – |
| 6 | 579,67 | – | – | – |
| 7 | 583,56 | – | – | – |
| 8 | 1104,2 | – | – | – |
| 9 | 1122,6 | – | – | – |

***Таблица 3.*** *Расчетные собственные частоты колебаний для БА, Гц*

| Номер моды | БА | Основание КУ | Фильтр | Основание |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 429,16 | 108,59 | 295,08 | 609,66 |
| 2 | 862,44 | 108,59 | 303,04 | 762,48 |
| 3 | 926,75 | 142,27 | 364,81 | 1156,1 |
| 4 | 938,20 | 142,28 | 420,03 | 1416,6 |
| 5 | 944,92 | 301,59 | 507,05 | 1605,8 |
| 6 | 961,00 | 301,60 | 541,31 | 1659,8 |
| 7 | 1255,9 | 310,54 | 687,11 | 1803,5 |
| 8 | 1289,3 | 310,57 | 694,94 | – |
| 9 | 1311,8 | 518,28 | 736,67 | – |

На рис. 2, 3 в качестве примеров приведены формы колебаний и перемещения на разных модах для отдельных элементов конструкции БМ и БА.

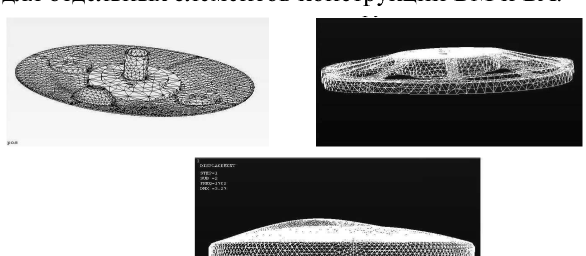
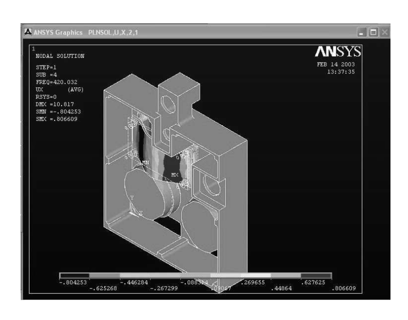
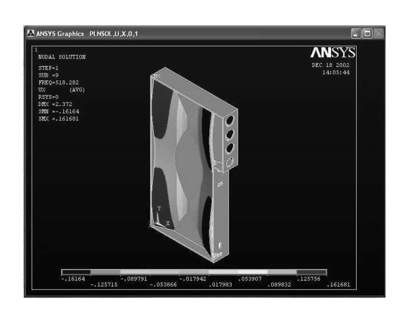


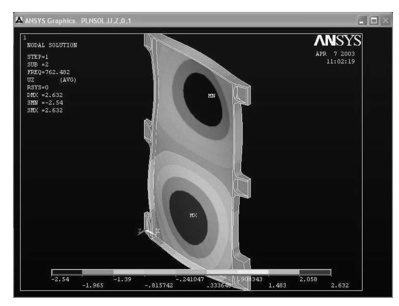
*Рис. 2.* Формы колебаний и перемещения на разных модах элементов конструкции БМ

Анализ механического поведения конструкции БМ и БА при воздействии случайных колебаний проводился в рамках спектрального анализа методом случайной вибрации.

В конструкции БМ напряженно-деформированное состояние возникает в местах присоединения спиц маховика.







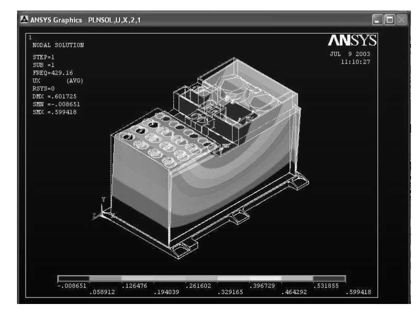
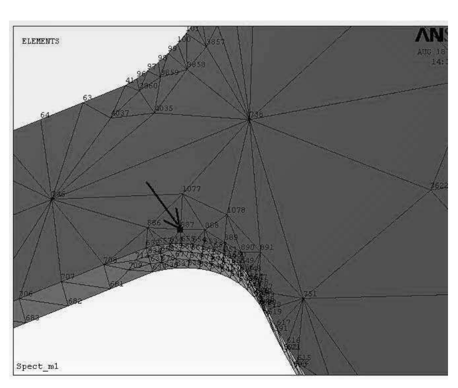


***Рис. 3.*** *Формы колебаний и перемещения на разных модах элементов конструкции БА*



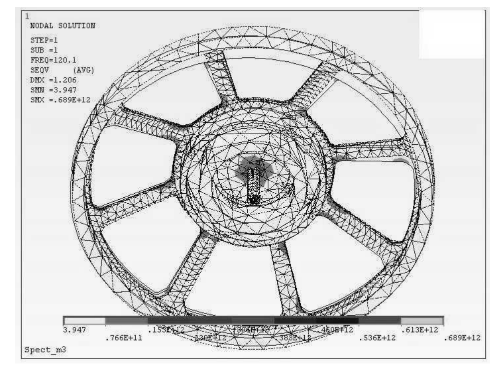


***Рис. 4.*** *Интенсивность напряжений и распределение сдвиговых напряжений*

На рис. 4 показана интенсивность напряжений (критерий Мизеса) в области узлов, указанных стрелкой, и распределение сдвиговых напряжений при совпадении собственных частот колебаний для одной из мод.

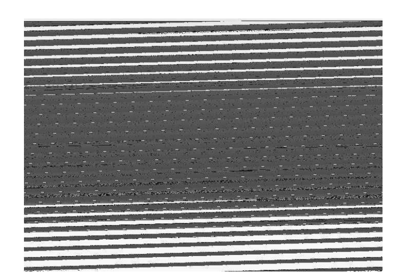
Гармонический анализ проводился как для элементов конструкций БМ и БА, так и для блоков в сборе.

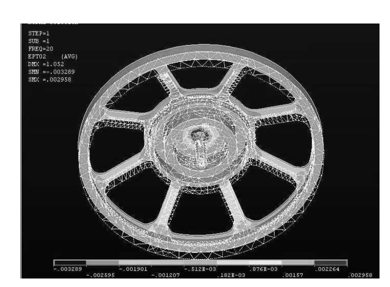
Для примера взяты перегрузки в 20 *g* при частоте 20 Гц для маховика.

При перегрузках 20 *g* максимальные расчетные значения интенсивности сдвиговых напряжений при частоте 20 Гц в области крепления маховика к валу составляют 1930 МПа. Коэффициент безопасности при этом <1,25. В случае возникновения в реальности воздействий с такими параметрами в конструкции маховика могут возникнуть остаточные деформации, что приведет к прекращению нормального функционирования БМ.

Соответствующие деформации по разным осям показаны на рис. 5.

У БА при синусоидальных воздействиях с уровнем 15 *g* выявлены превышения расчетных напряжений над допустимыми, при этом максимальные смещения в фильтре – 25, в основании – 1, в БА – 9 мм.





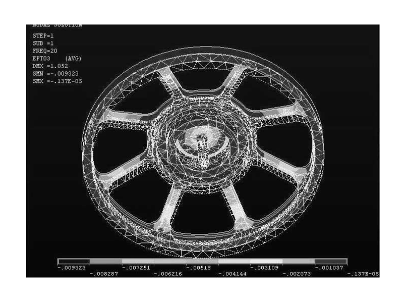
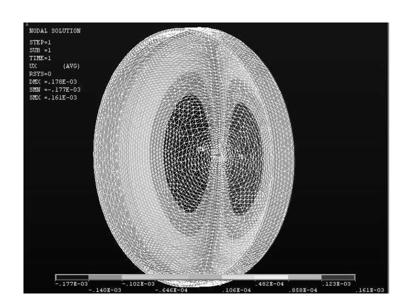
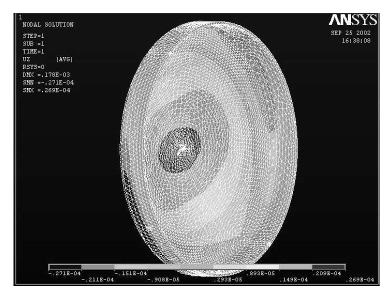


***Рис. 5.*** *Деформации конструкции маховика по разным осям при гармоническом анализе*





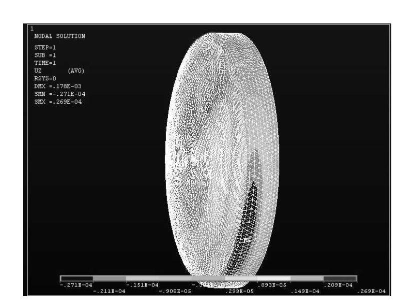
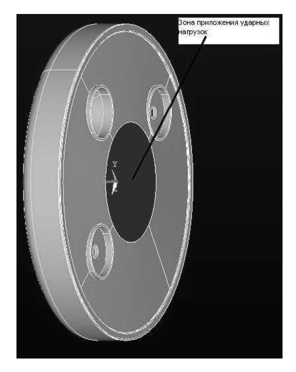



*Рис. 6. Смещения в кожухе при максимальных нагрузках*



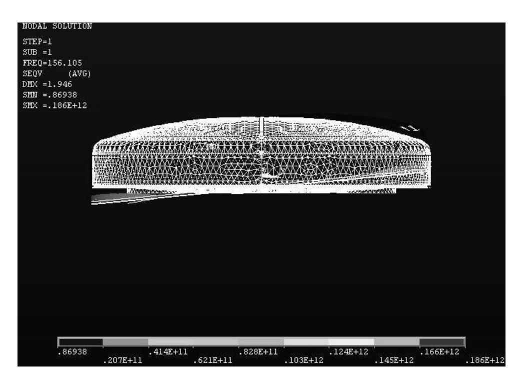




*Рис. 7. Деформация БМ при ударных нагрузках*

Анализ устойчивости конструкции (статический анализ), выполнялся для определения деформации кожуха прибора для критического случая – максимального давления $1,1 \cdot 10^5$ Па. Расчетный коэффициент безопасности получился 1,22; нормативный – 1,25.

На рис. 6 – результаты расчетов смещений в кожухе при максимальном давлении по осям X, Y, Z. Кожух находится в устойчивом состоянии, но дальнейшее повышение напряжений может привести к потере устойчивости.

Тепловой анализ (термо-прочностной) проводился для БМ с целью определения наличия или отсутствия заклинивания подшипников в заданном диапазоне температур. Смещение конструкции в диапазоне температур от –20 до +75 °C составляет $4,4 \cdot 10^{-2}$ мм, что не приводит к заклиниванию подшипников.

Конструкции БМ и БА исследовались на удар.

На рис. 7 показана деформация модели БМ при ударных нагрузках в поддиапазоне частот 35...50 Гц и амплитудах виброускорений 25...50 *g*. Деформация кожуха БМ обусловлена неравномерным распределением массы на основании БМ. Эти расчеты свидетельствуют о недостаточной жесткости пластины-основания.

Для БА ударные нагрузки на конструкцию намного превышают безопасный порог и не поддаются анализу.

В рамках этой работы была проведена экспериментальная проверка результатов расчетов, полученных при механическом анализе конструкции прибора.

Элементы конструкции и виды воздействий для экспериментальной проверки определялись заказчиком. Для экспериментальной проверки были выбраны собственные частоты маховика, устойчивость конструкции гермокожуха, и проверено поведение конструкции при тепловом воздействии.

Экспериментальное определение собственных частот колебаний маховика показало, что отличие на первой моде составило 2,3 %.

Экспериментальная проверка устойчивости конструкции гермокожуха заключалась в испытаниях кожуха при давлении 1200 ГПа (по техническому заданию – 1100 ГПа) в течение 5 мин, после чего кожух сохранил свою форму. Измерения размеров кожуха после испытаний не выявили остаточных деформаций.

Экспериментальная проверка поведения конструкции БМ при тепловом воздействии показала следующее. Результаты измерений момента сопротивления свидетельствовали о том, что конструкция БМ в диапазоне температур, заданных техническим заданием, нормально функционирует, отсутствует заклинивание подшипников как в зоне активных частот вентильного двигателя и датчика положения ротора, так и в шарикоподшипниковой опоре.

Сравнение результатов, полученных в эксперименте, с результатами расчетов с использованием разработанных моделей показало, что модели имеют достаточно хорошую степень достоверности и могут быть использованы в дальнейшем для различного вида прочностных анализов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**


1. Дмитриев В.С., Гладышев Г.Н., Лянзбург В.П., Чернышев А.И. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов на базе управляемых по скорости двигателей-маховиков // В сб. трудов Всеросс. электротехнического конгресса с международным участием. – М., 2000.
2. Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г. Автоматизация проектирования исполнительных органов систем ориентации космических аппаратов // Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения: Сб. докл. технологического конгресса. – Омск, 2001. – С. 143–146.
3. Dmitriev V.S., Kostuchenko T.G. Concept of automation design and preparing production of orientation system actuator of space devices based on T-flex programme product // 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2001). – June 26–July 3, 2001, Tomsk. – P. 23–25.
4. Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г., Скрипняк В.А. Механический анализ маховика исполнительного органа космического аппарата // Современные проблемы машиностроения и приборостроения: Сб. трудов I Междунар. конф. – Томск, 24–28 сент. 2002. – С. 84–85.
5. Dmitriev V.S., Kostuchenko T.G., Skripnyak V.A. Analysis of germcasing construction stability of spacecraft actuator // 8th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2004). – June 26–Jule 3, Tomsk, 2004. – V. 3. – P. 27–29.